第 37 卷第 11 期
2017 年 6 月

生 态 学 报
ACTA ECOLOGICA SINICA

Vol.37,No.11
Jun.,2017

DOI: 10.5846/stxb201604130678

夏楠,塔西甫拉提·特依拜,依力亚斯江·努尔麦麦提,张东,李云.卡拉麦里南部工业区梭梭和琵琶柴重金属空间分布及污染评价.生态学报,2017,37(11):3912-3918.

Xia N, Tiyip · Tashpolat, Nurmemet · Ilyas, Zhang D, Li Y.Heavy metal spatial distribution and contamination assessment of *Hadoxylon* and *Reaummuria soongorica* in an industrial area south of Kalamali.Acta Ecologica Sinica,2017,37(11):3912-3918.

卡拉麦里南部工业区梭梭和琵琶柴重金属空间分布及污染评价

夏 楠[1,2],塔西甫拉提·特依拜[1,2,*],依力亚斯江·努尔麦麦提[1,2],张 东[1,2],李 云[1,2]

1 新疆大学资源与环境科学学院,乌鲁木齐 830046

2 新疆大学绿洲生态教育部重点实验室,乌鲁木齐 830046

摘要:对五彩湾工业区周边 21 个采样点的梭梭(*Hadoxylon*)和琵琶柴(*Reaummuria soongorica*)的 Zn、Cu、Cr、Pb、As、Hg 6 种重金属元素含量测定,运用统计学方法和地统计插值法分析其茎叶和根部重金属含量变化情况和空间分布特征,并综合评价其污染程度和潜在生态危害性。结果表明:梭梭和琵琶柴植株 Hg 含量的最大值和均值都超出新疆土壤背景值 0.017 mg/kg,除梭梭根部的均值 0.060 mg/kg 未超出国家土壤背景值 0.065 mg/kg,在二者其他部位的最大值和均值都已超出;琵琶柴整株中 Cr 最大值 72.62 mg/kg 和 Zn 最大值 97.61 mg/kg 均超出新疆土壤背景值 49.3 mg/kg 和国家土壤背景值 61 mg/kg,Pb 元素未被检出。插值精度方面,Hg、As 的 RMSE 较小,分别为 0.263 和 0.443,预测模型中 Hg 的 R^2 为 0.72,Cu 的 R^2 为 0.67,能较好地估计预测样点的重金属含量,Zn 的 R^2 为 0.31,精度较低;插值结果,琵琶柴中的 Zn、Cr、As、Hg 含量较高的区域均在工业园区内部及周围,受人为扰动程度较大。梭梭和琵琶柴中 Hg 元素分别为中度污染和重度污染;Hg 元素为中等潜在危害程度高于其他 4 种元素。

关键词:荒漠矿区;梭梭;琵琶柴;重金属;评价

Heavy metal spatial distribution and contamination assessment of *Hadoxylon* and *Reaummuria soongorica* in an industrial area south of Kalamali

XIA Nan[1,2], TIYIP · Tashpolat[1,2,*], NURMEMET · Ilyas[1,2], ZHANG Dong[1,2], LI Yun[1,2]

1 *College of Resources and Environmental Sciences*, *Xinjiang University*, *Urumqi* 830046, *China*

2 *Key Laboratory of Oasis Ecology* (*Xinjiang University*) *Ministry of Education*, *Urumqi* 830046, *China*

Abstract: *Hadoxylon* and *Reaummuria soongorica*, two species of desert vegetation that occur near Juggar coal, were studied. Six kinds of heavy metals were detected in them, including Zn, Cu, Cr, Pb, As, and Hg. Conventional statistics and geostatistical analysis methods were used to determine the spatial distribution characteristics of heavy metals. The heavy metals in plants were assessed by the Nemerow integrated index to understand the current pollution status and potential ecological risk. The results suggested that maximum Hg (0.224 mg/kg), mean Hg (0.069 mg/kg) in stems and leaves, and mean Hg (0.215 mg/kg) in roots of *Hadoxylon* were all higher than the national baseline value in soil (0.065 mg/kg). Its maximum (0.92 mg/kg) and mean (0.066 mg/kg) in stems and leaves, and maximum (0.637 mg/kg) and mean (0.072 mg/kg) in roots of *Reaummuria soongorica* indicated similar results. In the whole body of *Reaummuria soongorica*, maximum Cr (72.62 mg/kg) and that of Zn (97.61 mg/kg) were higher than the soil baseline in Xinjiang (49.3 mg/kg)

基金项目:国家科技支撑计划项目(2014BAC15B01);国家自然科学基金资助项目(41561089)

收稿日期:2016-04-13; **网络出版日期**:2017-02-22

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: tash@ xju.edu.cn

and nationally (61 mg/kg). Pb was not found. Interpolated precision was better for Hg and Cu, but worse for Zn. Spatial analysis of *Reaummuria soongorica* revealed that Zn, Cr, As, and Hg exhibited large artificial disturbances. Hg moderately contaminated *Hadoxylon* and mildly contaminated *Reaummuria soongorica*. Zn in stems and leaves of *Reaummuria soongorica* was a potential risk, whereas the others were in the safe range. It is worth mentioning that Hg was at a moderately hazardous level, higher than the other four elements. Over time, research into metal pollution in plants will be intensified.

Key Words: desert mining area; *Hadoxylon*; *Reaummuria soongorica*; heavy metals; assessment

卡拉麦里山有蹄类野生动物自然保护区是蒙古野驴和普氏野马等国家重点保护动物的栖息地,这些珍贵的濒危物种正受到人类的严重威胁,包括栖息地的人为限制,偷猎,交通意外碰撞以及工业生产造成的环境污染问题,其中环境问题尤为严峻[1]。卡拉麦里中部有喀木斯特工业园,南部有五彩湾工业园,污染由内向外产生,已经影响野生食草动物的主要食物梭梭、红柳等小乔木和琵琶柴、骆驼刺等小、半灌木的生长。矿区植物中某些重金属含量过高会毒害植物的健康和抑制其生长[2-5],此外,重金属会随食物链富集到保护动物甚至人类体内[6-10]。因此对卡拉麦里保护区植物中的重金属元素进行监测和污染预警尤为重要。

近年来,许多学者对植物重金属污染监测和评价进行了大量研究。简敏菲等[11]监测鄱阳湖周边水生植物重金属含量,发现多种水生植物的根部 Cu、Cd、Zn、Hg 和 As 等重金属含量高于茎叶,这可能和湖泊的水位变化有关;周耀渝等[12]对湘西铅锌矿区的优势植物重金属含量进行测定,得出油茶属于富集型植物,毛萼莓、芒属于根部囤积型植物,对矿区的生物修复提供了参考;秦丽等[13]对云南会泽铅锌冶矿厂废渣堆周围茇茇草、莎草、土荆芥等植物进行了 Cd 的监测,这些植物表现出对 Cd 有很强的富集能力;王耀平[14]监测黄河口盐地碱蓬的 Cu、Cr、Zn、Hg 和 As 的含量,发现盐地碱蓬在淹水区对 Cu、Zn 富集能力较强,非淹水区只对 Cu 富集,且地上部分重金属含量高于根部。由以上研究发现 Cd、Cu、Cr、Zn、Pb、Hg 和 As 等元素对植物影响较大,可被认为是矿区的主要污染元素;这些研究多在湿润地区,而在干旱区对优势植物的监测和选取工作较少,梭梭和琵琶柴作为卡拉麦里保护区乔木和灌木的代表植物,监测其重金属污染状况更具有代表性。

为探索工业生产对保护区南部植物造成的污染状况,本文以五彩湾工业园区周边生长的典型荒漠植物梭梭和琵琶柴为研究对象,将其分为茎叶和根两部分,测得其重金属元素 Cu、Cr、Zn、Pb、Hg 和 As 含量,运用常规统计学方法和地统计方法分析其茎叶和根部重金属含量变化情况及其空间分布特征,并综合评价其污染程度和潜在生态危险性,为在该地区的环境保护和污染防治提供科学依据和数据支撑。

1　研究区概况

五彩湾工业园位于准噶尔盆地东部,卡拉麦里保护区南缘,盛产煤电能源。地貌为戈壁滩平原,地形平坦开阔,其工业基地范围内平均海拔 500—700 m,总体地势北高南低,如图 1。该地区属于大陆暖温带干旱气候,年均蒸发量 2070.3 mm,年均降水量 183.5 mm,无常年地表水流。主要以荒漠碱土、石膏棕漠土和荒漠风沙土为主的土壤类型[15]。植被类型主要是梭梭、琵琶柴、蛇麻黄、假木贼、白刺、骆驼刺等耐旱植被[16]。

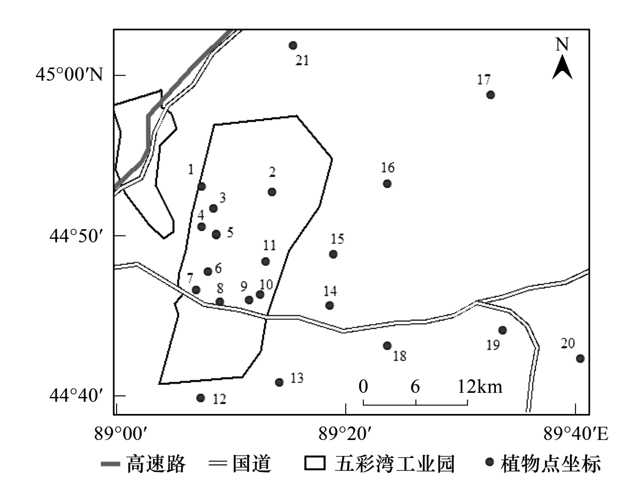


图 1　研究区地理位置和采样点分布图

Fig.1　Geographical position map of study area and distribution of sampling points

2　材料与方法

2.1　试验过程

采样点按照放射性布点法,以五彩湾工业园区为中

心每隔 45°设定方向以 5 km 为单位间距布设。由于植被单一且分布不均,因此按照实际样点的植被覆盖及道路状况选取 21 处采样点,每个采样点采集琵琶柴 3 株和梭梭 3 株,共计 126 个植物样本并用 GPS 记录实际采样点的坐标。将样本带入室内用去离子水清洗,自然晾干后将其分为茎叶和根两部分,放入电热风干箱调节温度至 105℃杀青 1 h,再调至 80℃烘干 24 h,用不锈钢粉碎机将植物磨碎,过 70 目筛。用湿灰化法对植物样品进行消解[17],经过稀释后定容,取上层清液用日立 Z-8000 型原子吸收分光光度计测定 Pb、Zn、Cr、Cu、Hg 和 As[18]。在本次试验中,大量植株未被检出 Pb 元素,因此不做分析,对每个采样点 3 株植物的茎叶和根部重金属含量分别计算平均值。

2.2 普通克里格插值方法

普通克里格法可利用研究区植物重金属的原始数据,以变异函数为工具,对该区域内植物重金属变量的预测值进行线性无偏最优估计。其公式为:

$$Z(x_0) = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i Z(x_i) \tag{1}$$

式中,$Z(x_0)$ 为估算点的植物重金属含量; $Z(x_i)$ 为已知样点植物重金属含量实测值; λ_i 为已知样本估计预测样本时的影响系数,其和为 1[19]。

2.3 污染评价方法

2.3.1 内梅罗综合污染指数法

内梅罗综合污染指数法[20]不仅兼顾了单因子污染指数平均值和最高值,还可以突出污染较重的污染物的作用,可用来评价每一个测试点的样品重金属综合污染水平。综合污染指数计算公式为:

$$P_{综} = \sqrt{\frac{(\frac{C_i}{S_i})^2_{max} + (\frac{C_i}{S_i})^2_{ave}}{2}} \tag{2}$$

式中,$P_{综}$表示内梅罗综合污染指数; $(\frac{C_i}{S_i})_{max}$ 表示重金属元素中污染指数最大值; $(\frac{C_i}{S_i})_{ave}$ 表示各污染指数的平均值;为污染物实测值 C_i (mg/kg); S_i 为污染物评价标准值(mg/kg)。污染物的评价参照《土壤环境质量标准》(GB 15168—1995)Ⅱ级标准。

2.3.2 潜在生态危害指数法

潜在生态危害指数法综合考虑了重金属的毒性、迁移变化规律、背景值差异和评价区域对重金属污染的敏感性,而且能综合反映重金属对生态环境影响的潜力指标。其计算公式为:

$$E_r^i = T_r^i \times C_f^i \tag{3}$$

$$H_{RI} = \sum_{i=1}^{n} E_r^i = \sum_{i=1}^{n} T_r^i \times C_f^i \tag{4}$$

式中, C_f^i 为重金属 i 污染系数($C_f^i = C_s^i / C_n^i$), C_s^i 为重金属 i 的实测含量, C_n^i 重金属 i 的背景值; T_r^i 为重金属 i 的生物毒性系数,其中 Hg(40)、As(10)、Pb(5)、Zn(1)、Cu(5)和 Cr(2); E_r^i 为重金属 i 潜在生态危害因子; H_{RI} 为多种重金属 i 潜在生态危害指数。按各元素的潜在生态危害指数划分等级[21-22]。

3 结果与分析

3.1 植物重金属元素分析

3.1.1 梭梭

运用 SPSS 20.0 对梭梭茎叶和根的 5 中重金属含量进行分析得到表 1:梭梭茎叶和根部重金属含量均值最高为 Zn 元素,最低为 Hg 元素,排序依次为 Zn> Cr > Cu > As >Hg;其茎叶中 Cu、Cr、Hg、Zn 含量的均值大于根部,As 小于根部,其富集差异不显著。梭梭茎叶中的 Hg 和根部的 As 变异系数均较大,属强变异;其整株(茎叶和根的加和)中 Cr、Cu、Zn 和茎叶中 As 变异系数在 0.27—0.55 之间,属中等变异。茎叶和根中 Hg 含量

最大值 0.224 mg/kg 和均值 0.069 mg/kg 都超出新疆土壤背景值 0.017 mg/kg 和国家土壤背景值 0.065 mg/kg[23]。

表 1　梭梭重金属含量统计分析

Table 1　Statistical analysis of heavy metal content in *Hadoxylon*

元素 Element	部位 Position	最大值 Max/(mg/kg)	最小值 Min/(mg/kg)	均值 Mean/(mg/kg)	标准差 Standard deviation	变异系数 Variation coefficient	分布类型 distribution type	国家土壤背景值 National soil background value/(mg/kg)	新疆土壤背景值 Xinjiang soil background value/(mg/kg)
Cr	茎叶	17.15	6.42	12.32	4.00	0.34	正态	61	49.3
	根	16.43	5.22	11.25	4.34	0.42			
Cu	茎叶	8.02	2.47	7.23	1.65	0.27	正态	22.6	26.7
	根	9.32	2.23	6.71	2.11	0.32			
Zn	茎叶	22.42	7.70	12.58	3.85	0.28	正态	74.2	68.8
	根	20.50	7.20	11.24	3.45	0.29			
Hg	茎叶	0.224	0.005	0.069	0.081	1.17	非	0.065	0.017
	根	0.215	0.005	0.060	0.064	1.02			
As	茎叶	0.41	0.05	0.19	0.12	0.55	正态	11.2	11.2
	根	1.02	0.06	0.25	0.31	1.03			

3.1.2　琵琶柴

表 2 中琵琶柴茎叶和根部重金属均值最高为 Zn 元素,最低为 Hg 元素,排序依次为 Zn> Cr > Cu > As > Hg;其茎叶中 Cu、Cr、Hg、As 含量的均值小于根部,Zn 大于根部,其富集差异不显著。相比梭梭,其整株中 Hg 元素的变异系数较大,属强变异;其余重金属元素变异系数在 0.44—0.92,属中等变异。茎叶和根部 Hg 含量最大值 0.92 mg/kg、0.637 mg/kg 和均值 0.066 mg/kg、0.072 mg/kg 都超出新疆和国家土壤背景值。整株中 Cr 最大值(72.62 mg/kg)和 Zn 最大值(97.61 mg/kg)均超出新疆土壤背景值 49.3 mg/kg 和国家土壤背景值 61 mg/kg。

表 2　琵琶柴重金属含量统计分析

Table 2　Statistical analysis of heavy metal content in *Reaummuria soongorica*

元素 Element	部位 Position	最大值 Max/(mg/kg)	最小值 Min/(mg/kg)	均值 Mean/(mg/kg)	标准差 Standard deviation	变异系数 Variation coefficient	分布类型 distribution type	国家土壤背景值 National soil background value/(mg/kg)	新疆土壤背景值 Xinjiang soil background value/(mg/kg)
Cr	茎叶	42.20	2.49	8.85	8.48	0.92	正态	61	49.3
	根	30.42	0.71	9.31	7.5	0.76			
Cu	茎叶	9.52	0.75	3.97	1.8	0.44	正态	22.6	26.7
	根	9.47	2.14	4.47	1.74	0.45			
Zn	茎叶	61.38	2.99	13.67	11.93	0.87	非	74.2	68.8
	根	36.23	3.25	10.68	8.11	0.76			
Hg	茎叶	0.92	0.002	0.066	0.19	2.88	非	0.065	0.017
	根	0.637	0.004	0.072	0.152	2.11			
As	茎叶	1.5	0.05	0.42	0.37	0.82	正态	11.2	11.2
	根	1.81	0.1	0.49	0.38	0.68			

3.2 植物重金属空间分布特征

3.2.1 特异值检验和插值精度验证

运用 ArcGIS 10.1 软件的 Explore Data 工具分析重金属数据的正态分布特征并选出特异值,其中未通过正态分布检验的重金属含量值需经过对数(Log)变换使其服从正态分布。表 3 所示 17 号点和 21 号点出现特异值,剔除插值过程中该点号在对应元素的重金属含量值。Cr 的 MAE 最大,为 1.578,其余元素 MAE 较小,Hg、As 的 RMSE 较小,分别为 0.263 和 0.443,Cu 和 Hg 的 R^2最大,预测值与实测值的线性拟合度较高,As 和 Cr 次之,Zn 最低。Hg 和 Cu 的插值效果较好,Zn 的预测精度较低但对于其空间分布仍具有参考价值。

表 3 空间插值中预测精度验证

Table 3 Validation of prediction accuracy in spatial interpolation

元素 Element	特异值点号 Outlier points	平均绝对误差 MAE	均方根误差 RMSE	决定系数 R^2
Zn	17,21	0.401	1.976	0.31
Cu	21	0.022	3.743	0.67
Cr	17	1.578	3.145	0.48
Hg	17	0.002	0.263	0.72
As	—	0.031	0.443	0.44

MAE: Mean absolute error, RMSE: Root mean square error

3.2.2 植物重金属含量空间分布图

在 WGS_1984 坐标系中,通过克里格插值得到 5 种重金属元素在琵琶柴中富集的空间分布特征(图 2)。图中 Zn、Cr、As、Hg 含量较高的区域均在工业园区内部及周围,说明琵琶柴中的这些重金属元素受人为扰动程度较大。Cu 元素表现出由西向东递增的自然分布,受到人为扰动较少。

3.3 污染评价

3.3.1 内梅罗综合污染指数法评价

植物重金属污染评价参照新疆土壤背景值分别计算梭梭和琵琶柴的茎叶和根部 5 种重金属的内梅罗综合污染指数,并取均值,结果如表 4 所示:梭梭茎叶和根部中 Hg 元素为中度污染,其余元素污染都表现为安全;琵琶柴茎叶和根部中 Hg 元素为重度污染,茎叶中 Zn 元素污染表现为警戒。2 种植物中 As、Cr、Cu、Zn 元素现阶段污染不严重。

表 4 植物重金属内梅罗综合污染指数评价

Table 4 Evaluation of Nemero comprehensive pollution index of heavy metals in plants

植物 Plant	部位 Position	Cr	Cu	Zn	Hg	As
梭梭 *Hadoxylon*	茎叶	0.19	0.38	0.39	2.96	0.01
		安全	安全	安全	中污染	安全
	根	0.18	0.44	0.35	2.63	0.02
		安全	安全	安全	中污染	安全
琵琶柴 *Reaummuria soongorica*	茎叶	0.41	0.40	0.94	10.97	0.03
		安全	安全	警戒	重污染	安全
	根	0.29	0.40	0.56	7.43	0.04
		安全	安全	安全	重污染	安全

3.3.2 潜在生态危害指数法评价

植物重金属潜在生态危害指数评价结果见表 5。其中梭梭茎叶 Hg 元素为中等潜在危害,其他 4 种元素为轻微潜在危害,梭梭根部 5 种元素均为轻微潜在危害;琵琶柴的茎叶和根部 Hg 元素为中等潜在危害,其他 4 种元素为轻微潜在危害。这两种植物潜在生态危害指数均小于 150,为轻微潜在生态危险。

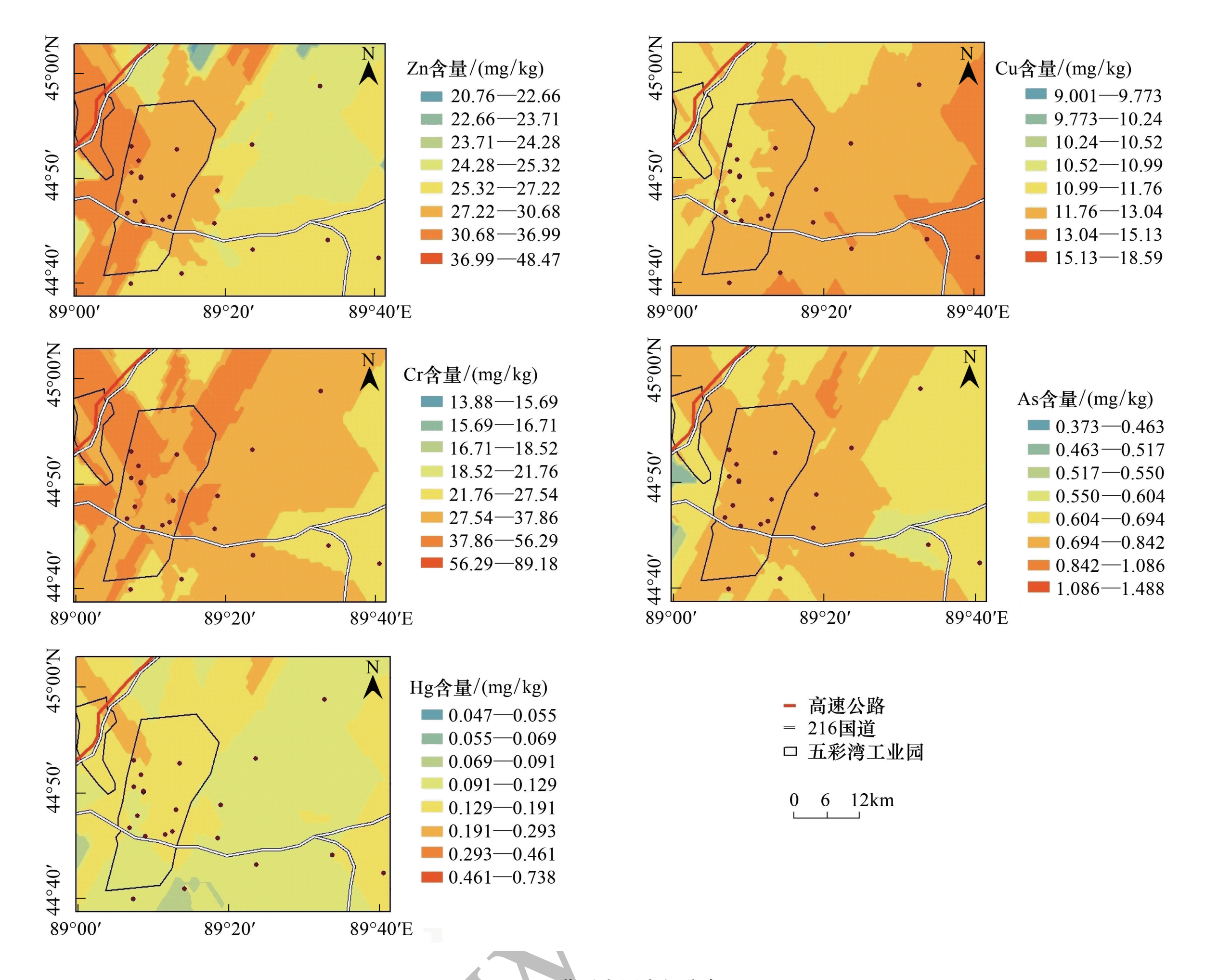


图 2　琵琶柴重金属空间分布图

Fig.2　The distribution map of heavy metal in *Reaumuria soongorica*

表 5　植物重金属综合潜在生态危害指数评价

Table 5　Evaluation of potential ecological risk index of heavy metals in plants

植物 Plant	部位 Position	项目 Project	Cr	Cu	Zn	Hg	As	H_{RI}
梭梭 *Hadoxylon*	茎叶	平均值	0.29	1.60	0.28	46.57	0.07	48.80
		污染程度	轻微	轻微	轻微	中等	轻微	轻微
	根	平均值	0.25	1.74	0.25	39.86	0.09	42.20
		污染程度	轻微	轻微	轻微	轻微	轻微	轻微
琵琶柴 *Reaumuria soongorica*	茎叶	平均值	0.23	1.07	0.29	40.89	0.14	42.62
		污染程度	轻微	轻微	轻微	中等	轻微	轻微
	根	平均值	0.24	1.22	0.23	44.77	0.17	46.64
		污染程度	轻微	轻微	轻微	中等	轻微	轻微

4　结论与讨论

(1)统计特征　梭梭与琵琶柴植株中 Hg 元素均值皆超出新疆土壤背景值和国家土壤背景值。5 种元素在两种植物茎叶和根部的含量表现出轻微差异性,但不显著,相比湿润区植物受水分影响所表现的强烈差异性[11,14],梭梭和琵琶柴的富集能力可能更多与土壤、大气及植物自身吸收特性有关。

(2)地统计分析　除 Zn 验证结果较差外其余元素均满足插值精度需要;琵琶柴中 Zn、Cr、As、Hg 含量较

高的区域均在工业园区内部及周围,受人为扰动影响明显。

(3)污染评价 Hg 元素在梭梭和琵琶柴中均出现较严重的污染现象,其他元素除琵琶柴茎叶的 Zn 处于警戒状态外尚属安全;Hg 元素在梭梭整株和琵琶柴茎叶中呈中等潜在危害,其他 4 种元素危害性较轻。Hg 污染表现强烈,可能与煤炭开采引起的表层土壤属性变化有关,为此将对这些样点的土壤剖面中 Hg 元素做进一步研究。

参考文献(References):

[1] 杨建军, 张园园, 周耀治, 吕光辉, 刘巍. 新疆准东露天煤矿生态安全评价研究. 中国矿业, 2015, 24(10): 76-82.

[2] Phillips D P, Human L R D, Adams J B. Wetland plants as indicators of heavy metal contamination. Marine Pollution Bulletin, 2015, 92(1/2): 227-232.

[3] Zhu C Y, Tian H Z, Cheng K, Liu K Y, Wang K, Hua S B, Gao J J, Zhou J R. Potentials of whole process control of heavy metals emissions from coal-fired power plants in China. Journal of Cleaner Production, 2016, (2006): 343-351.

[4] 黄小娟, 江长胜, 郝庆菊. 重庆溶溪锰矿区土壤重金属污染评价及植物吸收特征. 生态学报, 2014, 34(15): 4201-4211.

[5] Sun Z, Chen J J, Wang X W, Lv C. Heavy metal accumulation in native plants at a metallurgy waste site in rural areas of Northern China. Ecological Engineering, 2016, (2006): 60-68.

[6] 谢荣秀, 田大伦, 方晰. 湘潭锰矿废弃地土壤重金属污染及其评价. 中南林学院学报, 2005, 25(02): 38-41.

[7] Hao Q J, Jiang C S. Heavy metal concentrations in soils and plants in Rongxi Manganese Mine of Chongqing, Southwest of China. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(1): 46-51.

[8] 秦鱼生, 喻华, 冯文强, 王正银, 涂仕华. 成都平原北部水稻土重金属含量状况及其潜在生态风险评价. 生态学报, 2013, 33(19): 6335-6344

[9] 李韵诗, 冯冲凌, 吴晓芙, 石润. 重金属污染土壤植物修复中的微生物功能研究进展. 生态学报, 2015, 35(20): 6881-6890.

[10] 安丽, 曹同, 俞鹰浩. 上海市小羽藓属植物重金属含量及其与环境的关系. 应用生态学报, 2006, 17(8): 1490-1494.

[11] 简敏菲, 游海, 弓晓峰, 倪才英. 鄱阳湖典型区域重金属污染的水生植物监测与评价. 土壤通报, 2007, 38(2): 329-333.

[12] 周耀渝, 杨胜香, 袁志忠, 周建军, 张晓君. 湘西铅锌矿区重金属污染评价及优势植物重金属累积特征. 地球与环境, 2012, 40(3): 361-366.

[13] 秦丽, 祖艳群, 李元, 王吉秀, 李博, 李建国, 金显存. 会泽铅锌矿渣堆周边 7 种野生植物重金属含量及累积特征研究. 农业环境科学学报, 2013, 32(8): 1558-1563.

[14] 王耀平, 白军红, 肖蓉, 高海峰, 黄来斌, 黄辰. 黄河口盐地碱蓬湿地土壤-植物系统重金属污染评价. 生态学报, 2013, 33(10): 3083-3091.

[15] 夏楠, 塔西甫拉提·特依拜, 张飞, 侯艳军, 阿不都艾尼·阿不里, 张东. 新疆准东露天煤矿区地表温度反演及时空变化特征. 中国矿业, 2016, 225(1): 69-73, 96-96.

[16] 夏楠, 塔西甫拉提·特依拜, 丁建丽, 依力亚斯江·努尔麦麦提, 张东, 刘芳. 基于多光谱数据的荒漠矿区土壤有机质估算模型. 农业工程学报, 2016, 32(6): 263-267.

[17] 王颖雪, 王沛芳, 王超, 刘佳佳, 王睿喆. 太湖浮游植物中重金属含量的季节变化特征及湖区差异. 湖泊科学, 2015, 27(2): 258-265.

[18] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法. 3 版. 北京: 中国环境科学出版社, 1989: 440-458.

[19] 于洋, 卫伟, 陈利顶, 杨磊, 张涵丹. 黄土高原年均降水量空间插值及其方法比较. 应用生态学报, 2015, 26(4): 999-1006.

[20] Nayak A K, Raja R, Rao K S, Shukla A K, Mohanty S, Shahid M, Tripathi R, Panda B B, Bhattacharyya P, Kumar A, Lal B, Sethi S K, Puri C, Nayak D, Swain C K. Effect of fly ash application on soil microbial response and heavy metal accumulation in soil and rice plant. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2015, (2015): 257-262.

[21] 张倩, 陈宗娟, 彭昌盛, 李发生, 谷庆宝. 大港工业区土壤重金属污染及生态风险评价. 环境科学, 2015, 36(11): 4232-4240.

[22] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach. Water Research, 1980, 14(8): 975-1001.

[23] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.